

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

**YAHIAOUI Karim**

**M'HAMDI Djamel-Eddine**

## Thème

---

**Approche numérique à l'étude de la convection naturelle dans une cavité  
remplie de nanofluide**

---

Soutenu le 05-10-2021 devant le jury composé de :

Mr. F.MENDIL	Président
Mr. M.ADNANI	Rapporteur
Mr. M.HAMDI	Examineur

**Année Universitaire 2020-2021**



## Remerciements

*Nous tenons avant tout à remercier le miséricordieux tout puissant, car sans son aide et sa bienveillance, rien de cela n'aura pu être réalisé.*

*Nous tenons aussi, à exprimer nos gratitude, à notre encadreur M<sup>r</sup>. .... .., pour avoir accepté de nous guider tout au long de ce travail, pour tous les moyens mis à notre disposition, pour ses précieux conseils, et surtout pour son soutien qui nous a permis l'accomplissement de ce travail. Ainsi son dynamisme communicatif, sa bonne humeur qui nous a toujours apaisé et surtout pour sa patience.*

*Nous remercions infiniment, Mr..... pour nous avoir accordé l'opportunité de travailler dans le laboratoire R.B.A*

*Nous remercions aussi Mr. .... de nous avoir aidé à réaliser la partie biologique.*

*Merci pour l'ensemble des membres du jury de nous avoir fait l'honneur d'examiner et évaluer notre travail et de faire partie de notre jury.*

*Un grand remerciement à Mme //////////// pour son aide, orientation, soutiens, merci d'être comme une deuxième maman pour nous.*

*Nous tenons aussi à remercier Mme //////////// et tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.*

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*A mes très chers parents, que dieu vous protège, qui y ont toujours été à mon côté et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Pour tous les nobles sacrifices que vous avez imposés pour assurer mon bien être et mon éducation. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'affectation et l'amour que j'éprouve envers vous. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toutes mes reconnaissances et tout mon amour.*

Sans oublier, mes frères et mes sœurs, ainsi qu'à tous les membres de ma grande famille grands et petits.

A .....qui m'a encouragé et soutenu durant toute la période de nos études.

A mon binôme ..... pour tous les efforts qu'il a fournis durant la réalisation Nchalah on restera copains jusqu'à la fin de nos jours.

*Enfin je dédie ce travail à mes meilleurs amis et tout le monde qui m'ont connus, aimés, appréciés, encouragés de près ou loin pendant tous mon cursus*

*Djamel Eddine M*

## Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

*A mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».*

A mes chers frères et sœurs pour leurs soutiens moraux et qu'ils trouvent ici le témoignage de gratitude.

A mon binôme et meilleur copin islem pour tous les efforts qu'il a fournis pour le réaliser, que Dieu lui offre tout le bien de ce monde.

A tous mes cousins et cousines grands et petits, merci d'être toujours à mes côtés que ce soit dans le bien ou le pire.

A tous mes amis et à tous ceux qui me connaissent sans les avoir cités puisque la liste est grande.

*Karim. Q*

# Sommaire

<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Dédicaces</b>	<b>iii</b>
<b>Dédicaces</b>	<b>iv</b>
<b>Sommaire</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>x</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xi</b>
<b>NOMENCLATURE</b>	<b>xii</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>I Généralités et Synthèse Bibliographique</b>	<b>2</b>
I.1. Introduction	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.2. Généralité sur les nanofluides	<b>3</b>
I.2.1. Définition de nanofluide .....	<b>3</b>
I.2.2. Les fluides de base les plus utilisés .....	<b>3</b>
I.2.3. Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides .....	<b>4</b>
a. Les nanoparticules des oxydes métalliques [document.pdf]	<b>4</b>
b. Les nanoparticules métalliques	<b>4</b>
c. Les nanoparticules non métalliques	<b>4</b>
I.2.4. Préparation des nanofluides .....	<b>5</b>
a. Les procédés de fabrication des nanoparticules et les nanofluides	<b>5</b>

b. La fabrication des nanofluides	5
I.2.5. Applications des nanofluides.....	6
I.2.6. Applications automobiles.....	7
I.2.7. D'autres applications .....	7
I.2.8. Les avantages des nanofluides .....	8
I.2.9. Les inconvénients des nanofluides .....	8
I.3. Synthèse bibliographique	8
I.4. Conclusion	20
<b>II. Formulation mathématique et position du problème</b>	<b>17</b>
II.1. Introduction	17
II.2. Définition géométrique	17
II.3. Formulation mathématique	19
II.4. Propriétés thermo-physiques des nanofluides	17
II.4.1. La masse volumique.....	17
II.4.2. La fraction volumique ( $\varphi$ ).....	18
II.4.3. La chaleur spécifique :.....	18
II.4.4. Viscosité dynamique :.....	18
II.4.5. Conductivité thermique .....	19
a. La formule de Maxwell	19
b. Modèle de Hamilton et crosser :	19
c. Modèle de Yu et Choi [9]	20
II.5. Hypothèse et variation adimensionnelles	18
II.5.1. Les hypothèses simplificatrices : .....	18
II.5.2. Variation adimensionnelle .....	18
II.5.3. Equations adimensionnelles.....	19

a. Equation de continuité	19
b. Equation de quantité de mouvement	19
c. Equation d'énergie	20
II.6. Transfert de chaleur	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.1. Définition.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.2. Nombre de Nusselt : .....	20
II.6.3. Nombre de Rayleigh : .....	21
II.6.4. Nombre de Prandtl : .....	21
II.7. Méthode numérique	21
II.8. Méthode des volumes finie	21
II.9. Conclusion	21
<b>III. Résultats et Discussion</b>	<b>25</b>
III.1. Introduction	25
III.2. Validation des résultats	28
III.2.1. Résultat et discussion.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III.3. Choix de maillage	25
III.4. Discussion des résultats	31
III.4.1. Résultats et discussion .....	33
<b>IV. Conclusion Générale</b>	<b>8</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>9</b>
<b>Résumé</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>



<b>Numéro de figure</b>	<b>Titre de figure</b>	<b>Page</b>
Figure I.1	Nanotube de carbone	4
Figure I.2	Nanoparticules d'argent	5
Figure I.3	Problème étudié avec les conditions aux limites et le système de coordonnées	9
Figure I.4	Géométrie du problème	10
Figure I.5	Géométrie du problème	10
Figure I.6	Géométrie du problème	11
Figure I.7	Schéma de la géométrie du problème	13
Figure I. 8	Schéma de la cavité sous champ magnétique, Kasaeipoor et al. (2015).	14
Figure I.9	Schéma représentant la configuration étudiée et les conditions aux limites	15
Figure I.10	Schéma représentant la configuration étudiée et les conditions aux limites	16
Figure I.11	Modèle physique	16
Figure I.12	Problème physique étudié	17
Figure II.1	Géométrie du problème.	17
Figure III.1	Comparaison des lignes d'isothermes entre nos résultats et ceux de la référence	26
FigureIII.2	Comparaison des lignes courant entre nos résultats et ceux de la référence	27
Figure III.3	Étude de l'indépendance du maillage pour un nanofluide ( $AlO_3$ -eau) avec $\phi=0.02$ $Ra=10^4$	28
Figure III.4	Le maillage utilisé	29
Figure III.5	Evolution de résidu	30

Figure III.6	Les lignes de courants pour différents nombres de Rayleigh ( $Ra$ ) et ( $\phi$ )	31
Figure III.7	Les lignes de courants pour différents nombres de Rayleigh ( $Ra$ ) et ( $\phi$ )	32

### Liste des figures

## Liste des tableaux

Tableau II.1: les propriété thermo-physique utilisé.....	24
Tableau III. 1 : Étude de l'indépendance du maillage pour un nanofluide AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -eau.....	29

## NOMENCLATURE

### Symboles Latins

**C<sub>p</sub>** : la chaleur massique [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]

**K** : La conductivité thermique [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]

**L** : Longueur de l'ailette [m]

**T** : la température [K]

**T<sub>c</sub>** : la température de paroi chaude [K]

**T<sub>f</sub>** : la température de paroi froide [K]

### Symboles grecs

**$\alpha$**  : la diffusivité thermique [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ].

**$\beta$**  : coefficient d'expansion thermique [ $\text{K}^{-1}$ ].

**$\phi$**  : La fraction volumique

**$\mu$**  : La viscosité dynamique [ $\text{N.s.m}^{-2}$ ]

**$\rho_f$**  : Masse volumique du fluide [ $\text{Kg/m}^3$ ].

**$\rho_s$**  : Masse volumique de la nanoparticule [ $\text{Kg/m}^3$ ].

**$\rho_{nf}$**  : Masse volumique du nanofluide. [ $\text{Kg/m}^3$ ].

### Indices

f, s : fluide et solide.

nf : nanofluide

### Nombre adimensionnel

**Ra** : Nombre de Rayleigh

**Nu** : nombre de Nusselt local sur la surface de la source de chaleur

**Pr** : Nombre de Prandtl

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

L'une des nouvelles stratégies d'optimisation des échanges de chaleur, consiste à modifier la nature du fluide caloporteur afin d'améliorer ses propriétés thermiques. Les nanofluides sont aujourd'hui considérés comme étant une nouvelle catégorie de fluides, permettant d'améliorer les performances thermiques des systèmes faisant intervenir les échanges convectifs, en comparaison aux fluides caloporteurs traditionnels (l'eau, l'éthylène glycol ou le propylène glycol). Les nanofluides font référence à un liquide dans lequel sont mises en suspension, des particules de métaux ou d'oxydes de métaux de taille nanométrique.

Dans le premier, nous exposons une synthèse bibliographique permettant une meilleure appréhension des nanofluides, de leurs propriétés thermo physiques, les différents modèles utilisés pour l'estimation des propriétés thermo physique (conductivité thermique, viscosité dynamique...).

Après une description détaillée des nanofluides, nous présentons également des travaux antérieurs concernant l'intensification du transfert thermique induit par ces nanofluides dans les cavités. Ainsi, une revue des différents concernant l'étude numériques et expérimentales traitants les problèmes de convection laminaire dans les cavités ventilées bidimensionnelles d'en tenir compte pour orienter notre recherche vers la tridimensionnalité.

Dans le deuxième chapitre de notre travail s'attache à décrire les configurations géométriques du problème étudié, ainsi que les équations mathématiques régissant le phénomène de la nature, les hypothèses simplificatrices, le choix des variables adimensionnelles, et les conditions aux limites pour les deux configurations, bidimensionnelle (2D).

Dans le chapitre trois nous avons présentons les résultats de simulation pour le problème considéré (les contours des isothermes et des lignes de courant) pour chaque nombre de Rayleigh en fonction des fractions volumiques du nanofluide et le nombre de Nusselt en fonction de longueur ( $L$ ) de l'ailette. Les résultats de simulation obtenue ont été traduits en graphe

**Chapitre I**

**Généralités et Synthèse**

**Bibliographique**

# Généralités et Synthèse Bibliographique

## Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des connaissances actuelles relatives à la convection naturelle dans les enceintes et dans les nanofluides ainsi que leurs applications éventuelles, tant d'un point de vue théorique qu'expérimental.

Suite à l'apparition et au développement rapide des nanosciences et nanotechnologies pendant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, la convection a pris une grande part de cette nouvelle richesse, et a pris un autre aspect de perfectionnement c'est au niveau nanométrique de la matière du milieu convectif que les récents travaux ont été concentrés. En 1998, le chercheur Choi fut est le premier à poser l'idée que le nanofluide transfert mieux la chaleur que le fluide de base, ceci grâce au fait que les nanoparticules de métal ont une conductivité thermique largement supérieure à celle du fluide [1]

On peut différencier les nanofluides par différents critères à savoir :

- Taille et la forme des nanoparticules.
- Le type (métal ou oxyde métallique) et sa concentration.
- Le surfactant utilisé ainsi que sa concentration dans le nanofluide.
- La méthode de préparation du nanofluide.

Les nanofluides sont alors l'un des fruits d'une telle richesse. Dotés de propriétés physico-chimiques particulières et intéressantes telle que leur importante conductivité thermique, les nanofluides offrent un coefficient de transfert thermique imbattable. [2]

L'essor actuel des nanosciences a pour origine la mise en évidence des propriétés spécifiques de la matière aux dimensions nanométriques. Ceci a suscité de nouveaux champs d'étude dans de très nombreux laboratoires et a permis le développement des fluides aux propriétés originales. Nous restreindrons dans notre travail aux nanofluides. [3]



## **|Généralité sur les nanofluides**

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi. La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide par : [4]

- Convection naturelle (libre).
- Convection forcée.
- Convection mixte.

Le nanofluide est l'un des fluides qui sont en train d'émerger ces dernières années [5], à l'origine le nanofluide est un fluide caloporteur tel que l'eau, l'eau glycolée, l'huile à qui l'on rajoute des nanoparticules de métal (Al, Cu, Ag, Au, etc.) ou d'oxyde métallique ou non métallique (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>), et autre (formes allotropiques du carbone) dans des quantités relativement faibles. [1]

Récemment, une nouvelle classe de nanofluides, les « nanofluides hybrides », est utilisée pour améliorer encore le taux de transfert de chaleur [6] obtenus en dispersant, dans un fluide base, deux sortes de nanoparticules[7].

### **I.2.1. Définition de nanofluide**

Ce terme a été introduit par Choi au laboratoire d'Argonne en U.S American 1995 [4]. Le nom de nano-fluide est relatif aux composantes de ces fluides contenant des particules solides de taille nanométrique en suspension. Des études récentes, montre l'utilité de ces fluides dans le transfert de chaleur [8]

### **I.2.2. Les fluides de base les plus utilisés**

Les meilleurs nanofluides sont ceux qui comprennent l'eau, l'éthylène glycol et les huiles pour les fluides de base [9]

- L'eau.
- L'éthylène-glycol (EG).
- Les huiles.
- Le Toluène.

### I.2.3. Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides

Si le nanofluide doit être utilisé dans des applications de transfert de chaleur, il est avantageux de choisir des nanoparticules à haute conductivité thermique, comme les métaux ou les oxydes métalliques.

Les meilleurs nanofluides sont ceux qui comprennent l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Le cuivre Cu et le dioxyde de titane  $\text{TiO}_2$  pour les nanoparticules [9]

#### a. Les nanoparticules des oxydes métalliques

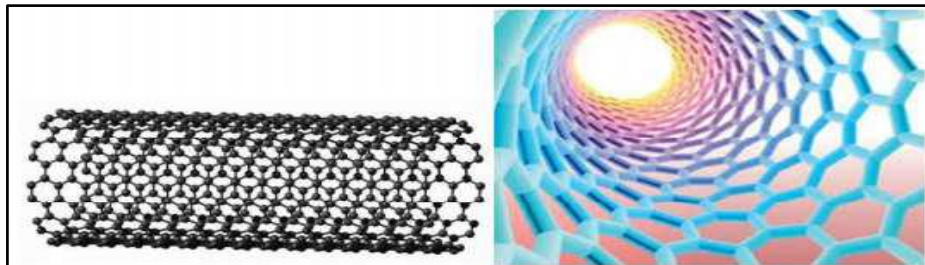
- L'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
- L'oxyde de cuivre (CuO).
- L'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ).
- L'oxyde de titanium ( $\text{TiO}_2$ ).

#### b. Les nanoparticules métalliques

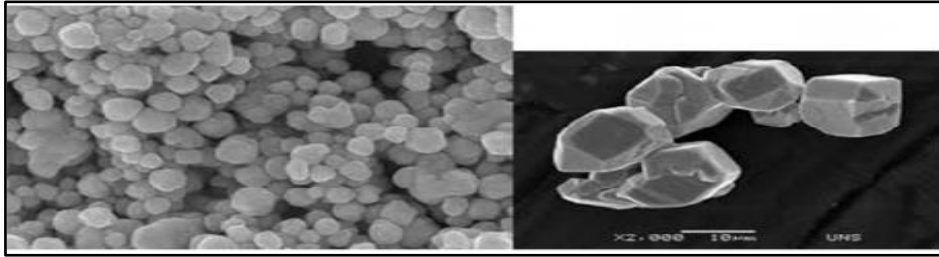
- L'aluminium (Al).
- Le cuivre (Cu).
- L'or (Au).
- L'argent (Ag).

#### c. Les nanoparticules non métalliques

- Les nanotubes de carbone (CNT).
- Le diamant(C).



**Figure.1** : Nanotube de carbone



**Figure I.2.** Nanoparticules d'argent

## I.2.4. Préparation des nanofluides

### a. Les procédés de fabrication des nanoparticules et les nanofluides

Le classement des nanoparticules se fait suivant deux catégories :

- **Les procédés physiques (comme le broyage mécanique) :**

C'est la méthode la plus simple et elle consiste à subdiviser un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique. Toutefois, cette méthode présente d'importantes limitations car elle ne permet pas un contrôle précis des distributions de taille.

- **Les procédés chimiques (comme la pyrolyse ou la précipitation chimique) :**

Ces méthodes permettent d'obtenir des particules avec une distribution de tailles relativement étroite et de morphologies variées. [10]

### b. La fabrication des nanofluides

La fabrication des nanofluides se fait en deux procédés. D'une manière générale l'ajout des nanoparticules dans un liquide de base peuvent être déroulé selon deux méthodes [3]

- **La première méthode a deux étapes :** consiste à produire des nanoparticules sous forme de poudre puis à les disperser dans le fluide de base au cours de traitement. Cette méthode présente des avantages économiques permet synthétiser en grande quantité. En outre la mise en suspension des particules est généralement accompagnée par des processus mécaniques pour la bonne homogénéisation dans le liquide de base pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules cependant l'agitation mécanique peut avoir des effets négatifs sur les propriétés des nanofluides.

- **La deuxième méthode a une seule étape :** la synthèse des nanoparticules se fait directement dans des liquides de base moins industrielle et elle présente l'avantage d'être simple, n'est utilisable que certaines nanofluides mais elle permet d'éviter l'agglomération [3].

### I.2.5. Applications des nanofluides

Les différents types de transferts de chaleur au sein des fluides conduit à de nombreuses applications pratiques et industrielles, y compris dans le transport, l'approvisionnement en énergie, la climatisation et le refroidissement électronique[3]

- **L'industrie** au sens large (moteur thermique, climatisation, composant de puissance, installation nucléaire, accélérateur de particules, domaine aéronautique ou spatial, etc.), car ça permet de réduire la taille des équipements de refroidissement ou leur consommation électrique puisqu'on gagne en efficacité sans trop se fatiguer. On estime en effet que pour doubler le coefficient d'échange, il faut multiplier la puissance de pompage par 10, ce qui est énorme et non rentable. Un nanofluide permet de s'en affranchir partiellement en améliorant ce coefficient jusqu'à 80% en régime turbulent sans modifier la puissance nécessaire au fonctionnement [11].

- **Refroidissement des systèmes électroniques :** Les nanofluides sont utilisés pour refroidir les micro- puces dans les Ordinateurs et ailleurs. Ils sont également utilisés dans d'autres applications électroniques qui utilisent des applications micro fluidiques. [12]

- **Refroidissement des systèmes thermiques :** Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides améliore le taux de refroidissement ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, Tzeng et col [13] ont dispersé les nanoparticules de CuO et Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission Dans une application, Zhang et que une étude pour réduire L'usure (lubrification) à l'aide des nanoparticules, et améliorer les propriétés tribologique, et la résistance à l'usure avec la réduction du frottement entre les éléments mécanique mobiles

- **Refroidissement des systèmes nucléaires** : Réalisé une étude pour évaluer la faisabilité des nanofluides dans les applications nucléaires en améliorant les performances de tout système nucléaire refroidi à l'eau dont l'évacuation de la chaleur est limitée. Les applications possibles comprennent le liquide de refroidissement primaire du réacteur à eau sous pression (REP), les systèmes de sécurité de secours, les cibles d'accélérateur, les détecteurs de plasma, etc. [14]
- **La biomédecine** : des nanofluides sont utilisés dans le domaine Biomédical depuis longtemps et son utilisation dans beaucoup d'applications en biomédicale [12]

Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles du traitement du cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale. Les nanofluides pourraient apporter une solution intéressante dans le refroidissement des miroirs, cibles et filtres des lasers et rayons X de forte puissance [15]

#### **I.2.6. Applications automobiles**

Huiles moteur, liquides de transmission automatique, liquides de refroidissement, Lubrifiants et autres fluides de transfert de chaleur synthétiques à haute température que l'on trouve dans les systèmes thermiques de camion conventionnels les radiateurs, les moteurs, le chauffage, la ventilation et la climatisation (CVC) ont des propriétés de transfert de chaleur intrinsèquement médiocres. Ceux-ci pourraient bénéficier de la conductivité thermique élevée dans les nanofluides résultant de l'addition de nanoparticules [12]

#### **I.2.7. D'autres applications**

Dans de nombreux cas, l'augmentation de l'efficacité du transfert de chaleur peut être liée à la qualité, la quantité et le coût des produits dans le processus. Par exemple, dans l'industrie des énergies renouvelables, les nanofluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et augmenter la densité énergétique. Les réfrigérants nanofluides ont des applications potentielles dans la plupart des industries de transformation, telles que les matériaux, la production chimique, l'alimentation, les boissons, le pétrole et le gaz. [14]

### I.2.8. Les avantages des nanofluides

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haut dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications

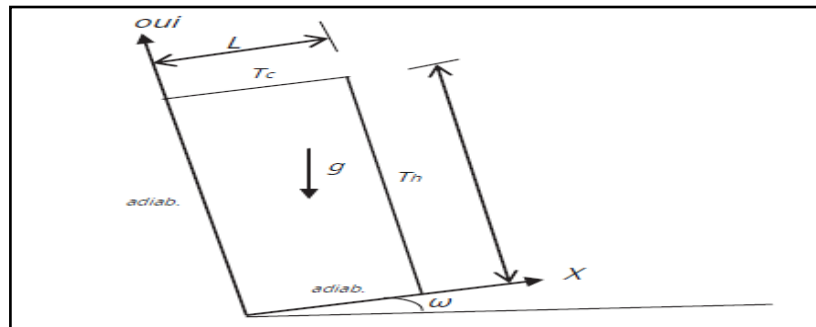
### I.2.9. Les inconvénients des nanofluides

- Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs
- Le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés
- Stabilité des nanoparticules dispersion
- Le coût élevé des nanofluides
- Difficultés dans le processus de production [16].

## | Synthèse bibliographique

Dans cette partie, nous allons présenter quelques résultats de nos recherches sur notre thème de nanofluide.

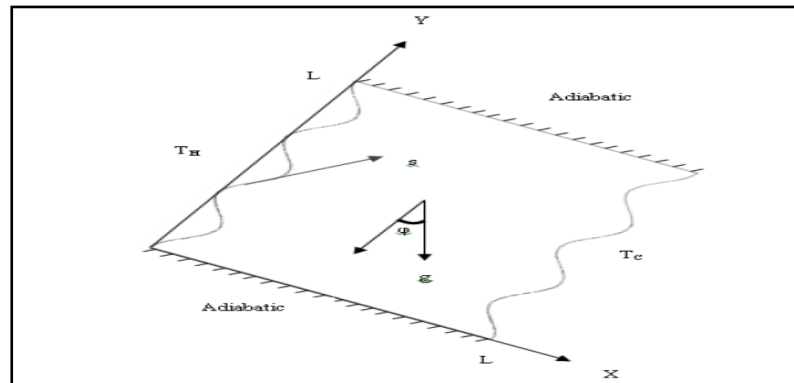
**Mefteh Bouhaleb et Hassan Abbassi** ont présenté l'effet du nombre de Rayleigh sur les nanofluides à l'intérieur de l'enceinte et l'influence des nanoparticules sur le transfert de chaleur dans la cavité. Le transfert thermique de fluide par convection naturelle dans une cavité inclinée remplie nanofluides (CuO-eau) et refroidi par la paroi supérieure. De plus ils ont présenté les équations de la transmission de l'écoulement est résolue numériquement par la méthode des éléments de volumes finis utiliser l'algorithme SIMPLER basé sur la prédiction numérique.



**Figure I.3. Problème étudié avec les conditions aux limites et le système de coordonnées.[15]**

Dans cette étude, le flux de convection naturelle bidimensionnel stable nanofluides CuO-eau dans une chambre chauffée d'un côté et refroidie par un refroidisseur plafond. Équations couplées non linéaires de quantité de mouvement et l'énergie, y compris la flottabilité, est d'environ Boussinesq est résolu numériquement. L'effet du nombre de rayleigh.

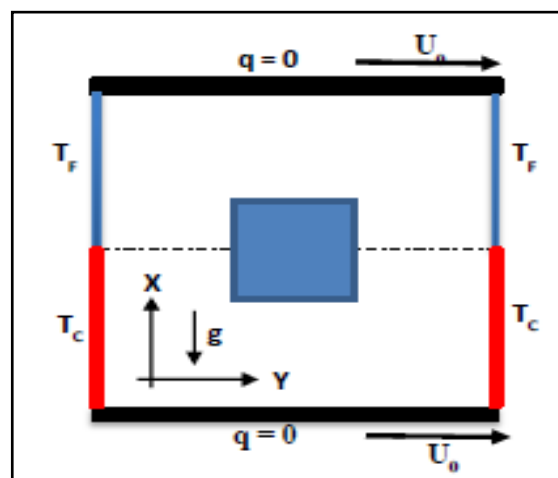
**Elif Büyük ÖĞÜT et al** ont présenté dans cette étude, des simulations numériques ont été réalisées pour étudier la convection naturelle des nanofluides à base d'eau. Cavité murale ondulée avec bords carrés obliques. Les parois supérieure et inférieure de la cavité sont supposées être adiabatiques, et les parois latérales sont dans différents états de température constante. Trois types différents de nanoparticules ont été utilisés dans l'étude, Cu, CuO et  $Al_2O_3$ . Calculer la fraction volumique solide comme 0%, 5% et 10%, et le nombre de Rayleigh comme  $10^4$ ,  $10^5$  et  $10^6$ . Les angles d'inclinaison de 0.450 et 90o, les amplitudes de 0.05, 0.075 et 0.1 et les nombres 1 et 3 de la cavité fermée sont analysés. Ondulation. Les résultats montrent que le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et nombre de rayleigh de plus il est observé que l'augmentation du nombre d'ondulations augmentera considérablement le taux de transfert de chaleur.



**Figure I.4.** Géométrie du problème.[16]

D'après les résultats, le nombre de Rayleigh, fraction volumique, type de nanoparticules, amplitude, le nombre d'ondulations et l'angle d'inclinaison ont un effet significatif sur la structure de la circulation et le taux de de transfert de chaleur. Le taux de transfert de chaleur augmente, avec l'augmentation de la circulation du fluide en raison du nombre de rayleigh. Le transfert de chaleur se fait par conduction pour les faibles valeurs du nombre de rayleigh.

**M. ADNANI ET AL** [17] ont présenté une étude numérique de la convection mixte dans une cavité carrée en présence d'un bloc froide a l'intérieure de la cavité. Ils ont mené trois configurations pour les deux parois froid et chaud, les nombre de Reynolds et dépend son fixé à  $Re=100$ ,  $Pr=0,71$  respectivement.



**Figure I.5.**Géométrie du problème. [17]



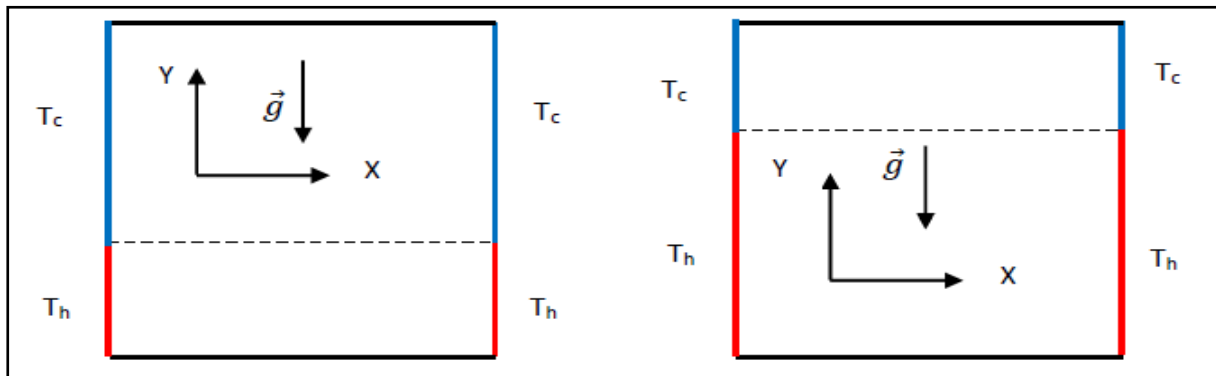
Dans ce travail, les auteurs ont proposé une étude numérique de la convection mixte dans une cavité à la limite de la chaleur et de la cinématique. On considère une cavité avec un rapport d'aspect égal à 1, qui est remplie de fluide Newton est en régime permanent et en flux laminaire. Les équations qui contrôlent le flux et le transfert de chaleur sont des équations de quantité de mouvement, de continuité et d'énergie. Résoudre par la méthode des volumes finis système algébrique. Les résultats montrent que le transfert de chaleur augmente à mesure que le nombre de Richardson augmente.

Cette expérience elle montre que le transfert de chaleur et le champ d'écoulement augmentent avec l'augmentation de Ri dans les deux cas

Considéré dans cette étude. De plus, lorsque les deux parois bougent, le transfert de chaleur semble être plus efficace.

**ADNANI et al** [18] Dans ce travail, ils ont fait une étude numérique bidimensionnelle de la convection naturelle a été réalisée. Nous considérons une cavité contenant un fluide newtonien avec un rapport d'aspect  $H/L$  égal à 1, où ( $H$  et  $L$ ) sont respectivement la hauteur et la largeur de la cavité. Les équations principales sont l'équation de quantité de mouvement, l'équation de continuité et l'équation d'énergie. La méthode des volumes finis [5] est utilisée pour résoudre les systèmes algébriques. Afin de voir l'effet des conditions aux limites thermiques sur le transfert de chaleur et le champ d'écoulement comme le montre la figure (Figure I.6), dans le premier cas, 25 % de la partie inférieure de la paroi latérale est maintenue à une température élevée ( $T_h$ ), et 75 % de la partie supérieure de la paroi latérale est maintenue à une température basse température ( $T_c$ ), où ( $T_h > T_c$ ). Dans le second cas, 75 % de la partie inférieure de la paroi latérale est maintenue à haute température, et 25 % de la partie supérieure de la paroi latérale est maintenue à basse température. Le mur horizontal reste isolé.

La recherche est menée sur des nombres de Rayleigh et des nombres de Prandtl de valeurs différentes. Les résultats montrent que lorsque le nombre de Rayleigh augmente, le transfert de chaleur devient plus évident



**Figure I.6.** Géométrie du problème. [18]

**ADNANI et al** [19] Une étude numérique de la convection naturelle dans une cavité carrée affectée par les conditions aux limites thermiques sur les parois latérales est proposée et discutée. Le fluide est un fluide newtonien, et les équations régissant le champ d'écoulement et le transfert de chaleur sont données sous forme adimensionnelle. La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre le système algébrique. Expliquez et discutez l'influence du nombre de Prandtl et du nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur et le champ d'écoulement avec la fonction d'écoulement, l'isotherme, la vitesse horizontale, le nombre de Nusselt local et moyen. Les résultats montrent que lorsque le nombre de Rayleigh augmente, le transfert de chaleur s'améliore de manière plus évidente. Surtout sous un faible nombre de Rayleigh, le champ d'écoulement est légèrement significatif avec l'augmentation du nombre de Prandtl et diminue avec l'augmentation du nombre de Rayleigh. En revanche, le transfert de chaleur n'est pas affecté par le changement du nombre de Prandtl vers un nombre de Rayleigh faible et diminue à mesure que le nombre de Prandtl augmente, en particulier pour les nombres de Rayleigh très élevés.

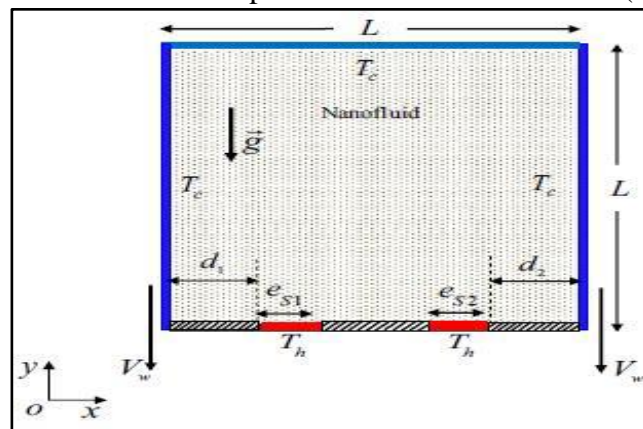
Dans ce travail, une étude numérique de la convection naturelle en régime permanent dans une cavité carrée affectée par les conditions aux limites de la paroi latérale est réalisée. Le fluide considéré est le fluide newtonien. Les équations régissant le flux et le transfert de chaleur sont données sous forme adimensionnelle. La méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre le système algébrique. Le format sans dimension de l'équation gouvernante

montre les nombres sans dimension, à savoir le nombre de Rayleigh et le nombre de Prandtl. Afin de voir l'effet de ces nombres sur le champ d'écoulement et le transfert de chaleur, différentes valeurs de  $Ra$  et  $Pr$  ont été vérifiées. Les résultats indiquent que :

À mesure que le nombre de Rayleigh augmente, le transfert de chaleur et le champ d'écoulement deviennent plus évidents, et la couche limite thermique a tendance à croître vers la paroi latérale sous des nombres de Rayleigh très élevés.

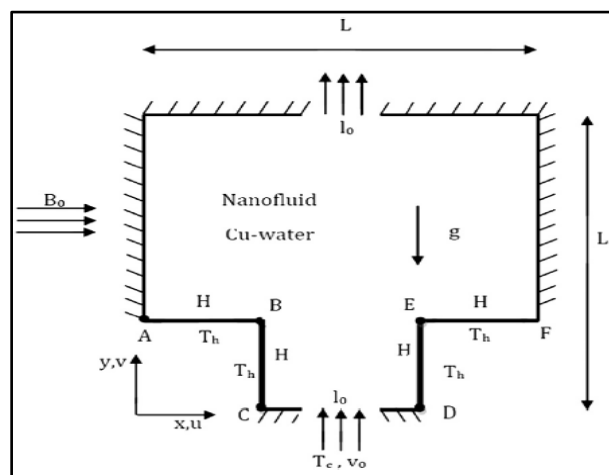
Pour les faibles nombres de Rayleigh, le champ d'écoulement est légèrement plus important lorsque le nombre de Prandtl augmente et diminue lorsque le nombre de Rayleigh augmente, tout comme le transfert de chaleur n'est pas affecté par les changements du nombre de Prandtl avec les faibles nombres de Rayleigh. Pour les très grands nombres de Prandtl, à mesure que les nombres de Prandtl augmentent, le champ d'écoulement devient moins évident pour le nombre de Rayleigh.

**Moumni et al**[4] ont étudié numériquement l'écoulement bidimensionnel et le transfert de chaleur par convection mixte de nanofluides (Eau-Cu, Ag,  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$ ) dans une cavité partiellement chauffée par le bas. Deux sources de chaleur discrètes sont situées sur la paroi inférieure de l'enceinte ; cependant, les parois verticales et la paroi supérieure sont refroidies à température constante. Les parties restantes de la paroi inférieure sont adiabatiques. Les effets des nombres de Reynolds ( $1 \leq Re \leq 100$ ), de Richardson ( $1 \leq Ri \leq 20$ ), de la fraction volumique des nanoparticules ( $0 \leq \phi \leq 0,2$ ), des matériaux des nanoparticules ainsi que la position des deux sources de chaleur ont été étudiés. Il a été constaté que l'amélioration significative du transfert de chaleur dépend fortement de l'augmentation des nombres de Richardson et Reynolds, de la présence et du type de nanoparticules, et de la position des deux sources de chaleur situées sur la paroi inférieure de l'enceinte (figure I. 7).



**Figure I.7.** Schéma de la géométrie du problème. [4]

**Moumni et al, Kasaeipoor et al**[4] ont présenté les résultats d'une étude numérique sur la convection mixte du nanofluid Cu-eau dans une cavité en forme de T en présence d'un champ magnétique uniforme. Certaines sections de la paroi de fond de la cavité sont chauffées à une température constante et les autres parois sont isolées thermiquement. Le nanofluid à une température relativement basse entre par le bas de la cavité. Les effets de paramètres tels que les nombres de Reynolds ( $10 \leq Re \leq 400$ ), de Richardson ( $0,01 \leq Ri \leq 10$ ), de Hartmann ( $0 \leq Ha \leq 80$ ), la fraction volumique du solide ( $0 \leq \phi \leq 0,06$ ) et le rapport d'aspect de la cavité ( $0,1 \leq AR \leq 0,4$ ) sur l'écoulement du fluide et les performances thermiques de la cavité ont été étudiés.

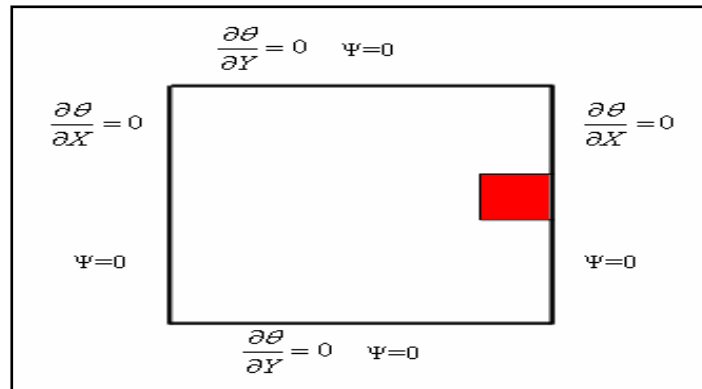


**Figure I. 8.** Schéma de la cavité sous champ magnétique.[4]

Les résultats indiquent que la présence de nanoparticules améliore le transfert de chaleur, sauf à  $Re = 100$  et  $Ha < 10$  ainsi que  $Re = 400$  et  $Ha < 60$ , où l'eau pure a un taux de transfert de chaleur légèrement plus élevé par rapport au nanofluid. En outre, l'influence du nanofluid sur l'augmentation du transfert de chaleur augmente à mesure que le rapport d'aspect augmente. Pour  $Ri = 0,01$  et  $1$ , le taux de transfert de chaleur maximal est obtenu à  $AR = 0,4$  ; cependant, pour  $Ri = 10$ , le taux de transfert de chaleur maximal se produit à  $AR = 0,1$  (figure I. 8).

Les résultats montrent que t'augmentation de  $Ri$  suivre d'une augmentation du champ d'écoulement, pas contre aux faibles gradients de température le transfert thermique varié en fonction du sens du mouvement des parois horizontal.

**Hicham.Salhi et al** [2] ont présenté dans ce travail on a mené une étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans une enceinte carrée chauffée par une section carrée et remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules.

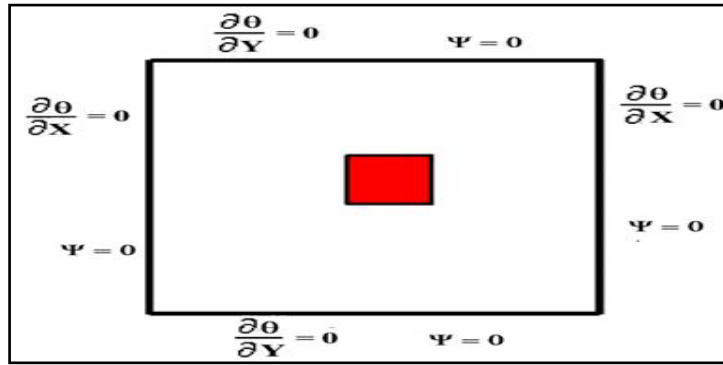


**Figure I.9.** Schéma représentant la configuration étudiée et les conditions aux limites.[2]

Les résultats principaux se résument dans :

- ❖ L'effet du nanofluide sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre de Rayleigh élevé.
- ❖ L'augmentation de la fraction volumique du nanofluides favorise d'avantage le transfert de chaleur.
- ❖ Le transfert thermique en présence des nanoparticules d'Ag s'améliore relativement à celui des nanoparticules de TiO<sub>2</sub>. En conséquence, le type de nanoparticule est un facteur principal pour le perfectionnement de transfert thermique.

**H. Salhi et M. Si-Ameur** [2] le travail réalisé par ces derniers auteurs est l'étude numérique de la convection naturelle laminaire stationnaire dans une enceinte carrée chauffée par une section carrée et remplie d'un mélange d'eau et des nanoparticules.

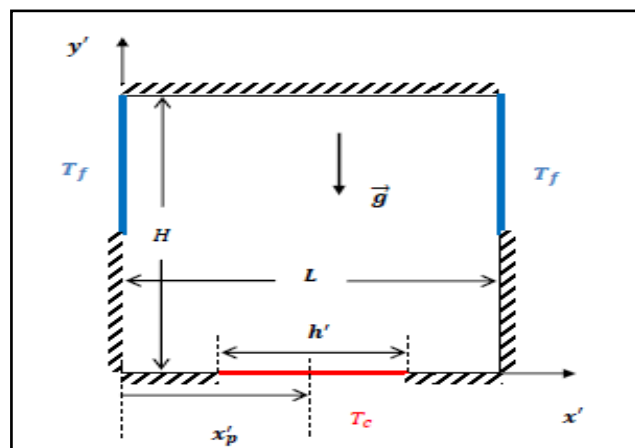


**Figure I.10.** Schéma représentant la configuration étudiée et les conditions aux limites.[2]

Les résultats principaux se résument dans L'effet du nanofluides sur la convection se manifeste particulièrement à un nombre De Rayleigh élevé et L'augmentation de la fraction volumique du nanofluides favorise davantage le Transfert de chaleur.

Le transfert thermique en présence des nanoparticules d'Ag s'améliore relativement à celui des nanoparticules de TiO<sub>2</sub>. En conséquence, le type de nanoparticule est un facteur principal pour le perfectionnement de transfert thermique.

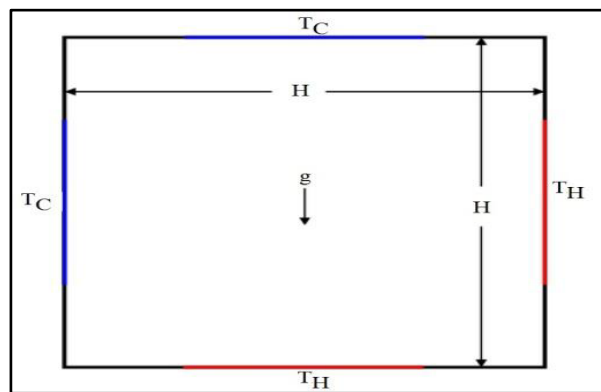
**B.Boudjeniba et al** [20] ont à une étude numérique concerne les transferts de chaleur par convection naturelle dans une cavité rectangulaire fermé contenant un nanofluides de base d'eau et des particules nanométrique de cuivre. La paroi horizontale inférieure est partiellement chauffée et les deux parois verticales de gauche et de droite sont refroidies sur leurs moitiés supérieures.



**Figure I.11.** Modèle physique [20]

Les résultats obtenus avec différentes fraction volumique pour  $Ra=10^4$  et  $10^5$  dans une cavité bidimensionnelle remplie de nanofluide. Le transfert de chaleur est important l'osque un élément de chauffage est centré et a le nombre de Rayleigh plus élevée.

**N.Sad chemloul et M.A.Belmiloud** [21] L'étude numériquement de la convection naturelle dans une cavité carrée dont la paroi horizontale inferieur et la paroi verticale droite sont chauffées, le nanofluide utilisé il est à trois différents types de nanoparticules à l'intervalle  $0 \leq \varphi \leq 0.15$  nombre de Rayleigh est compris entre  $10^3$  et  $10^6$  le nombre de Prandtl est fixé à  $Pr=6.2$



**Figure I.12.** Problème physique étudié. [21]

Les résultats montrent que le transfert de chaleur s'améliore à l'augmentation de nombre de Rayleigh et la valeur de la fraction volumique.

## Propriétés thermo-physiques des nanofluides

### I.4.1. La masse volumique :

$$\rho_{nf} = \left[ \frac{m}{v} \right]_{nf} = \frac{m_f + m_S}{V_f + V_S} = \frac{\rho_f V_f + \rho_S V_S}{V_f + V_S} \quad \text{I.1}$$

Avec :

$\rho_{nf}$  : La masse volumique du nanofluide

$\rho_f$  : La masse volumique du fluide de base

$\rho_S$  : La masse volumique des nanoparticules solides

#### I.4.2. La fraction volumique( $\varphi$ )

La fraction volumique des nanoparticules, noté( $\varphi$ ) désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide +solide).

$$\varphi = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume totale de nanofluide}} = \frac{V_s}{V_s+V_f} \quad \text{I.1}$$

Où  $V_s$ : Volume des nanoparticules solides [ $m^3$ ].

$V_f$  : Volume du fluide de base [ $m^3$ ].

On en déduit alors la masse volumique du nanofluide pour une température donnée qui s'écrit :

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi)\rho_f \quad \text{I.1}$$

#### I.4.3. La chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène. La détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut utiliser l'une des relations suivantes :

De nombreux auteurs dont PAK et CHO ont utilisé :

$$(CP)_{nf} = (1 - \varphi)(Cp)_f + \varphi(CP)_s \quad \text{I.1}$$

Certains autres dont Xuan et Roetzel XUAN et ROETZEL ont utilisé :

$$(\rho CP)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho Cp)_f + \varphi (\rho Cp)_p \quad \text{I.1}$$

#### I.4.4. Viscosité dynamique :

Viscosité dynamique d'un nanofluide donné par Einstein [2] pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f + (2.5\varphi + 1) \quad \text{I.1}$$

Où  $\mu_{nf}$  : La viscosité dynamique du nanofluide.



$\mu_f$ : La viscosité dynamique du fluide de base.

$\varphi$  : La fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable pour le cas de particules sphériques et pour de très faible fraction Volumique  $\varphi \leq 0.03$ .

La viscosité dynamique effective du nanofluide peut être présentée par des modèles de mélange à deux phases. Dans cette étude, le modèle de Brinkman (1952) pour les nanofluides à particule est utilisé :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}$$

#### I.4.5. Conductivité thermique

##### a. La formule de Maxwell

A été développée pour tenir compte des effets de la taille des particules, de la fraction volumique des particules et de la dépendance à la température ainsi que des propriétés du liquide de base, se présente sous la forme :

$$k_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)\varphi}{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)\varphi} K_f$$

$k_{nf}$ ,  $K_f$ ,  $K_s$  désignent respectivement les conductivités thermiques du nanofluide, du fluide de base et des particules solides.

##### b. Modèle de Hamilton et Crosser :

Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite de modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'est valable que dans le cas des particules sphériques. La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n - 1)K_f - (n - 1)(K_f - K_s)\varphi}{K_s + (n - 1)K_f + (K_f - K_s)\varphi} K_s$$

### c. Modèle de Yu et Choi [9]

Une autre expression pour calculer la conductivité thermique a été introduite par Yu et Choi [65]. Ils ont proposé de modéliser les nanofluides comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. De plus, ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique est plus grande que la conductivité thermique de liquide.

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)(1 + \beta)^3 \varphi}{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)(1 + \beta)^3 \varphi} K_f$$

Modèles corrélations semi-empirique

$$K_{nf} = (28.905\varphi^2 + 2.8273\varphi + 1)K_f \quad \text{Pour le nanofluide (EG + Al}_2\text{O}_3)$$

$$K_{nf} = (-13\varphi^2 + 6.3\varphi + 1)K_f \quad \text{Pour le nanofluide (Al}_2\text{O}_3 + \text{Eau)}$$

$$K_{nf} = (11.6\varphi^2 + 9.6\varphi + 1)K_f \quad \text{pour le nanofluide (Cu + Eau)}$$

$$K_{nf} = (7146\varphi^2 + 76.6\varphi + 1)K_f \quad \text{Pour le nanofluide (Huile + Ntc)}$$

## |Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les nanofluides, avec ces préparations et leurs domaines d'applications. Cette partie s'achève par une synthèse bibliographique qui a présenté les différentes études menées à des nombreux laboratoires et a permis le développement des fluides aux propriétés originales, Nous consacrons dans notre travail aux nanofluides.

# **Chapitre II**

## **II. Formulation**

**mathématique et position du  
problème**

# Formulation mathématique et position du problème

## Introduction

Ce chapitre conduira à l'élaboration de notre modèle physique ainsi que les équations différentielles mathématiques contrôlant les phénomènes de convection naturelle au sein d'une cavité en présence d'un nanofluide. Chaque Phénomène physique est souvent formulé par des équations mathématiques (équations différentielles) qui représentent une modélisation de ce phénomène. La modélisation exprime le comportement des phénomènes dans l'espace et dans le temps une modélisation doit obligatoirement exprimer le comportement du phénomène dans l'espace et dans le temps.

## Définition géométrique

La géométrie considérée est sur la figure II.1. Elle représente une cavité carrée rempli de nanofluide. La surface de la paroi inférieure est supérieure est maintenue adiabatique, la paroi droite chauffée par une source de chaleur (paroi chaude) et la paroi gauche est refroidies (paroi froide) celle-ci est doté d'une ailette horizontale chaude de longueur  $L=0.5$  et situé au milieu de la paroi  $h=0.5$ .

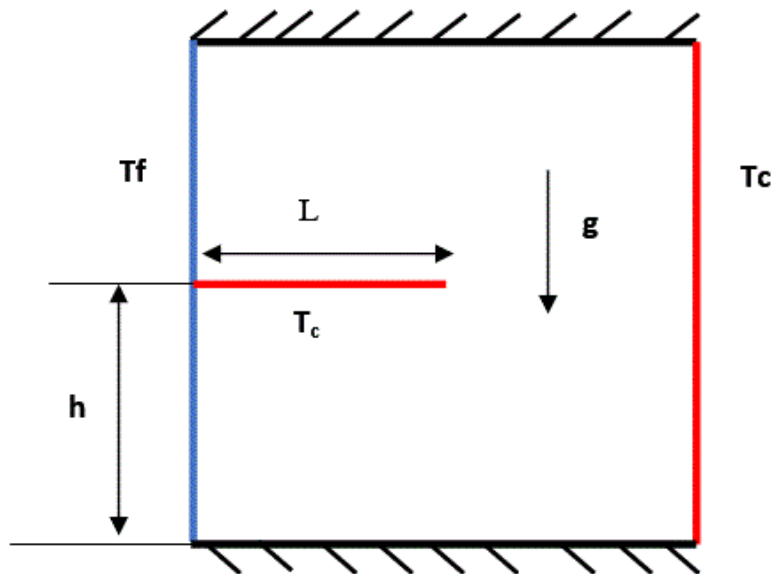


Figure II.1. Géométrie du problème.

## Hypothèse et variation adimensionnelles

### II.3.1. Les hypothèses simplificatrices :

Il est maintenant nécessaire d'effectuer un certain nombre hypothèses afin d'établir un Modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème, donc on adopte les hypothèses suivantes :

L'écoulement est stationnaire et bidimensionnel.

Le fluide est Newtonien et incompressible.

L'écoulement engendré est laminaire.

Le flux de la source de chaleur est constant dans le temps.

Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

La puissance volumique dissipée est négligeable. Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable. La masse volumique du fluide varie linéairement avec la température. Cette variation Est donnée par la relation d'approximation de boussinesq :

#### Approximation de boussinesq :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)]$$

Avec :

$$\beta = - \frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_p$$

$\beta$ : Coefficient d'expansion thermique à pression constante

$\rho_0$ : La masse volumique de référence (à la température  $T_0$ )

$T_0$ : La température de référence.

### II.3.2. Variation adimensionnelle

$$X = \frac{x}{L} \quad , \quad Y = \frac{y}{L} \quad , \quad U = \frac{u}{a_f/L} \quad , \quad V = \frac{v}{a_f/L} \quad , \quad P = \frac{L^2}{\rho_f a_f^2} p \quad , \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$$

## Formulation mathématique

Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Equation de quantité de mouvement

Selon x :

$$\left( U \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} \right) = - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \right) + \frac{1}{\rho_{nf}} (\rho\beta)_{nf} (T - T_C)$$

Selon y :

$$\left( U \frac{\partial v}{\partial X} + v \frac{\partial v}{\partial Y} \right) = - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial Y^2} \right) + \frac{1}{\rho_{nf}} (\rho\beta)_{nf} g (T - T_C)$$

Equation de l'énergie

$$\left( U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} \right) = a_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right)$$

Le  $a_{nf}$  est le coefficient de diffusion thermique du nanofluide et il décrit comme suit :

$$a_{nf} = \frac{K_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}}$$

### II.4.1. Equations adimensionnelles

#### a. Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

#### b. Equation de quantité de mouvement

Selon x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_f a_f} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra Pr \theta$$

Selon y :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_f a_f} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \frac{K_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra Pr \theta$$

**c. Equation d'énergie**

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{a_{nf}}{a_f}$$

**Tableau II.1:** la propriété thermo-physique utilisée :

Propriété thermo- Physiques	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp(J/kg)	K (W/m.K)	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )	$\mu$ Kg/ms
L'air	1.1273	1006.43	0.0242	0.003508	//
Eau pure	997.1	4179	0.613	21 10 <sup>-5</sup>	1.7894.10 <sup>-5</sup>
Alumine (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3970	765	40	0.85 10 <sup>-5</sup>	//

**II.4.2. Nombre de Nusselt :**

C'est le rapport de la quantité de chaleur échangé par convection par quantité de chaleur échangé par conduction, il s'écrit sous forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Flux convectif} = h \cdot \Delta T \\ \text{Flux conductif} = K \cdot \frac{\Delta T}{L} \end{array} \right. \rightarrow \frac{\text{Flux convectif}}{\text{Flux conductif}} \quad Nu = \frac{h_{nf} L}{K_f}$$

Où  $h$  : Le coefficient d'échange thermique [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>].

### II.4.3. Nombre de Rayleigh :

Le nombre de Rayleigh est proportionnel entre l'importance relative de la poussée d'Archimède et le produit de la trainée visqueuse par le taux de diffusion thermique. Dans cette équation  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $(\beta)$  est le coefficient de dilatation thermique  $\mu_f$  est la viscosité cinématique,  $(T)$  est la différence de température entre les parois latérales.

$$Ra = \frac{g\beta_f L^3 \Delta T}{\mu_f a_f}$$

$$a = \frac{K}{\rho c_p} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \text{ (La diffusivité thermique).}$$

### II.4.4. Nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl est proportionnel au rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique. Il caractérise l'importance relative des effets thermiques et visqueux.

Il s'écrit sous forme :  $\mu_f$

$$Pr = \frac{\mu_f}{a_f}$$

## | Méthode numérique

### II.5.1. Méthode des volumes finie

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui converti les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques dont la résolution numérique est possible. Elle est basée sur l'intégration des équations aux dérivés partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisés qui assurent la conservation de toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle.

## | Conclusion

La résolution des équations d'un phénomène physique de convection thermique naturelle se fait par l'utilisation d'une méthode numérique. Cette dernière consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations.



# **Chapitre III**

## **[III. Résultats et Discussion]**

# Résultats et Discussion

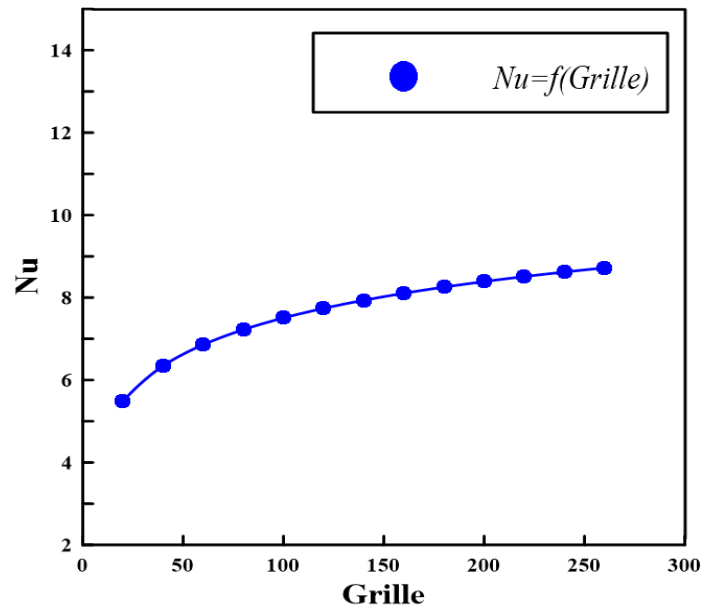
## Introduction

Dans notre travail, nous avons effectué une simulation numérique moyennant, Pour obtenir une solution numérique du problème étudié, on doit transformer les équations différentielles du modèle mathématique au moyen d'un processus de discrétisation en un format facile pour le processus numérique. Ce format n'est autre que le système d'équations algébriques obtenu après la discrétisation. Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis.

Nous présentons dans ces études les isothermes et les lignes de courant pour différentes nombre de rayleigh et la fraction volumique. Nous terminons par une étude relative au transfert thermique en considérant le nombre du Nusselt local et moyen avec différentes fractions volumiques.

## Choix de maillage

Pour examiner et évaluer l'indépendance du maillage sur la solution numérique, neuf maillages uniformes sont considérés : 20x20, 40x40, 60x60, 80x80, 100x100, 120x120, 140x140, 160x160 et 180x180, nœuds, pour un nanofluide ( $Al_2O_3$ -air), avec  $\phi = 0.02$   $Ra=10^4$ .



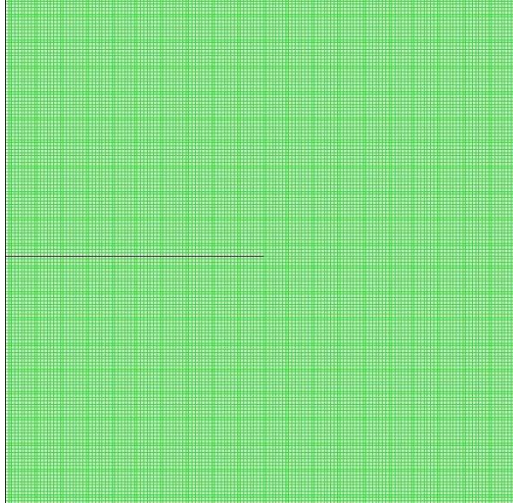
**Figure III.1** : étude de l'indépendance du maillage pour un nanofluide ( $AL_2O_3$ -air), avec  $\varphi = 0.02$   $Ra=10^4$ .

Dans la figure III.1 on constate que la variation du nombre de Nusselt moyen reste presque constante à compter du maillage 160x160 nœuds. Par conséquent, pour des raisons de compromis, de précision.

**Tableau (III. 1)** : Étude de l'indépendance du maillage pour un nanofluide ( $AL_2O_3$ -air), avec  $\varphi = 0.02$  et  $Ra = 10^4$

Maillage (Nœuds)	20x20	40x40	60x60	80x80	100x100	120x120	140x140	160x160	180x180
Nu	5.4822	6.3449	6.8571	7.2223	7.5061	7.7380	7.9341	8.1039	8.2536

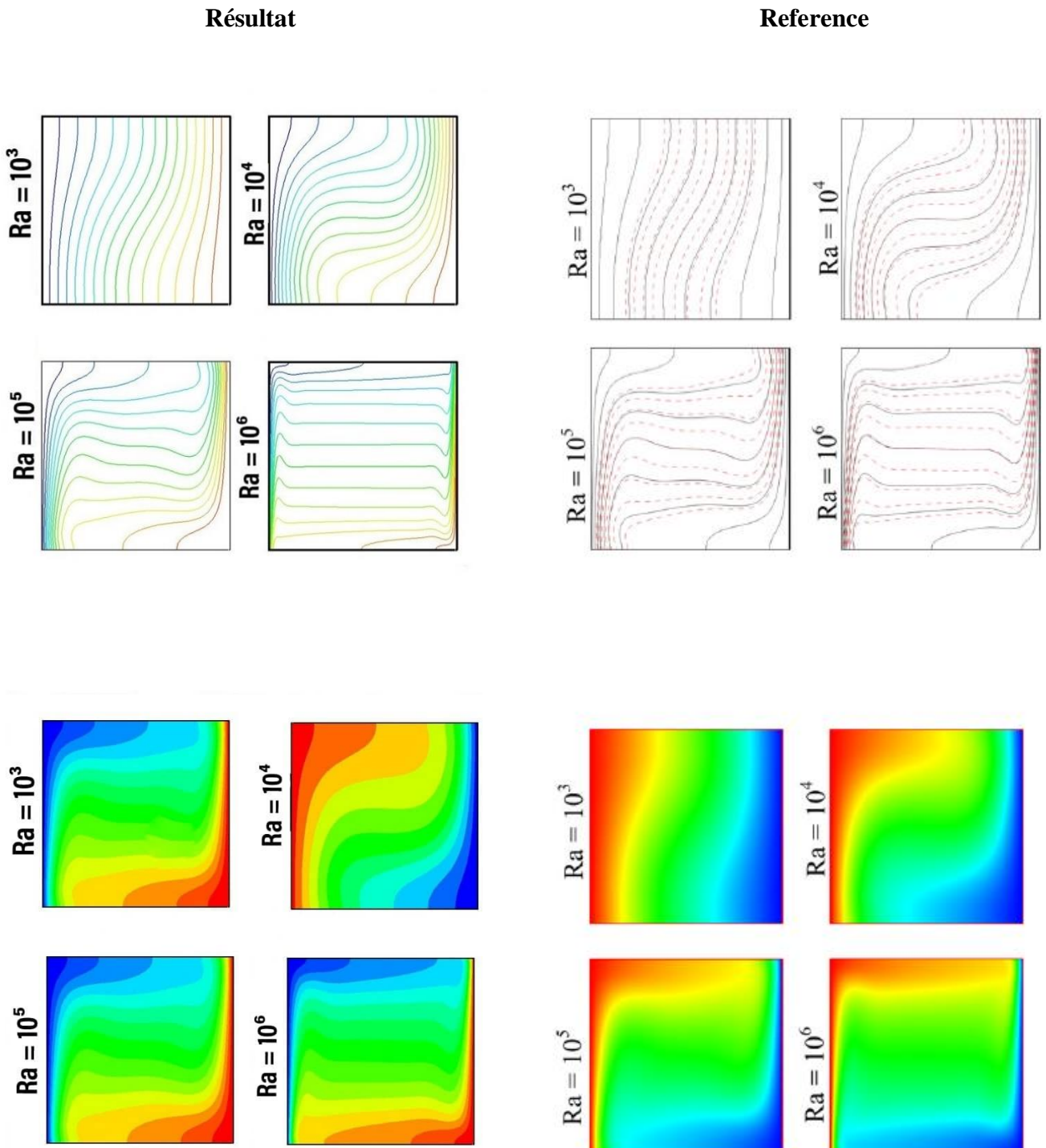
Les résultats de l'effet du maillage sur le nombre de Nusselt moyen sont présentés dans le Tableau (III. 1)



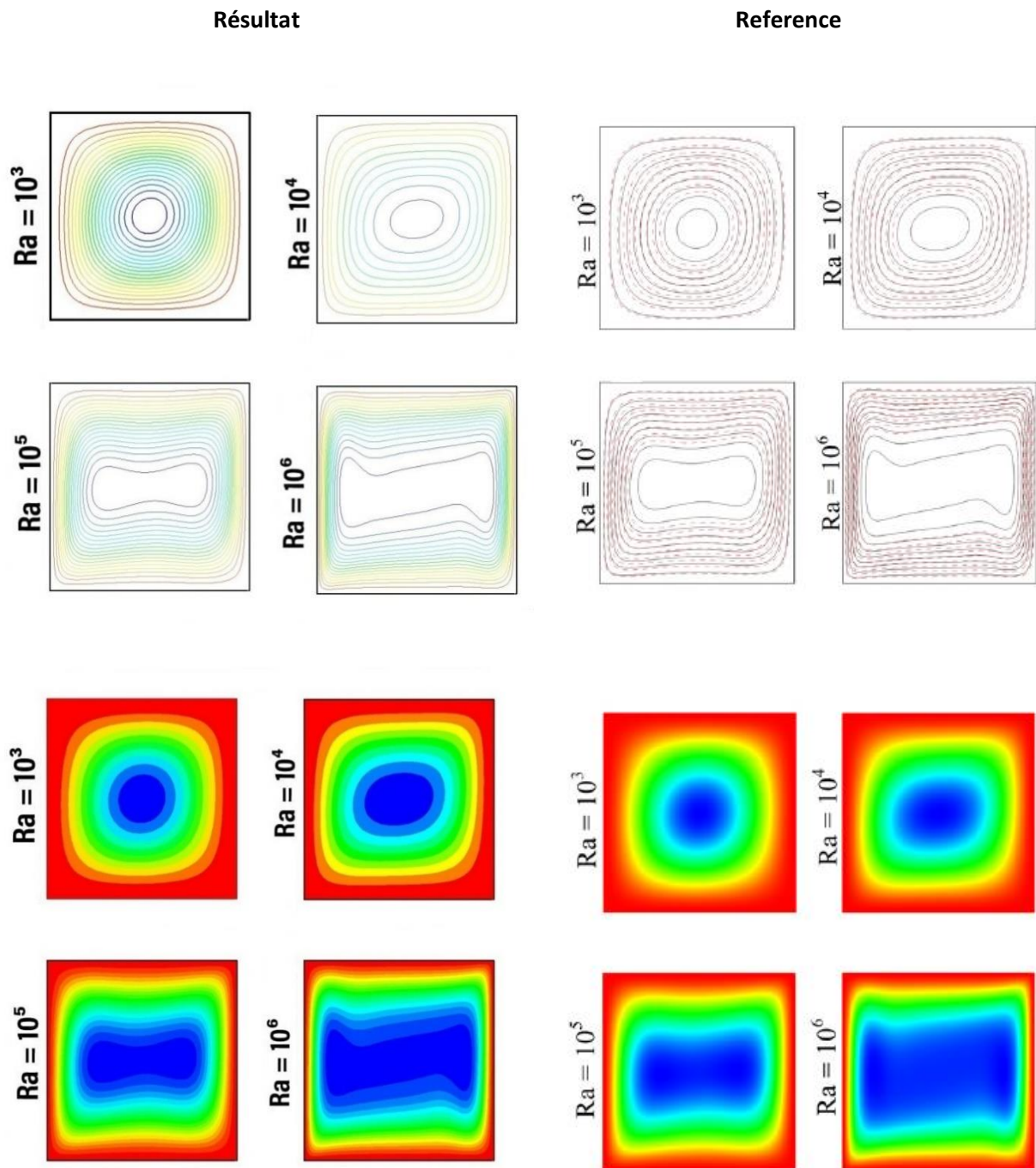
**Figure III.2 :** Le maillage utilisé.

La figure (III.2) montre la grille utilisée. Les équations de Continuité, de quantité de mouvement bidimensionnelle et d'énergie sont résolues Numériquement en utilisant la méthode des volumes finie.

## Validation des résultats



**Figure III.3** Comparaison des lignes d'isothermes entre nos résultats et ceux de la référence



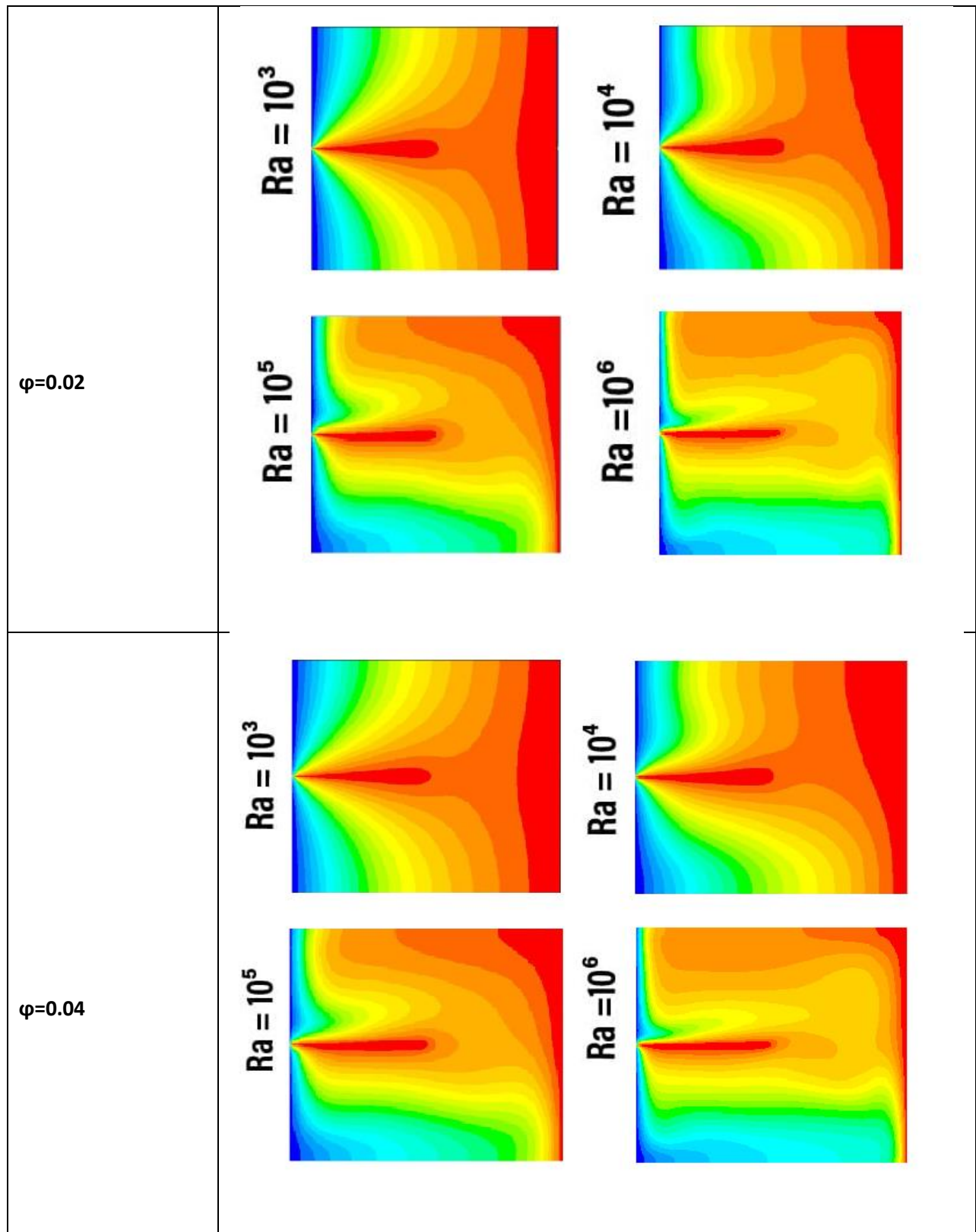
**Figure III.4** Comparaison des lignes courant entre nos résultats et ceux de la référence

Pour vérifier la concordance de nos résultats numériques, le code de calcul a été validé avec les résultats numériques de [22] qui avaient étudié la convection Naturelle dans une cavité carrée remplie de nanofluide (eau- $AL_2O_3$ ). Les parois supérieures et inférieures étaient isolées tandis que la paroi latérale gauche était maintenue à une température chaude et celle

du côté droit maintenue à une température froide. La comparaison concerne les isothermes, iso courant.

La comparaison est faite en considérant les changements du nombre de Rayleigh (Ra). Cette Comparaison des isothermes et des lignes de courant avec les données expérimentales (Figure III.3), et les résultats Comparaison de la valeur numérique (figure III.4) montre une excellente consistence. Cela peut donc vérifier notre Programme de simulation numérique.

## Discussion des résultats



**Figure III. 5** Les lignes de courants pour différents nombres de Rayleigh ( $Ra$ ) et ( $\varphi$ )



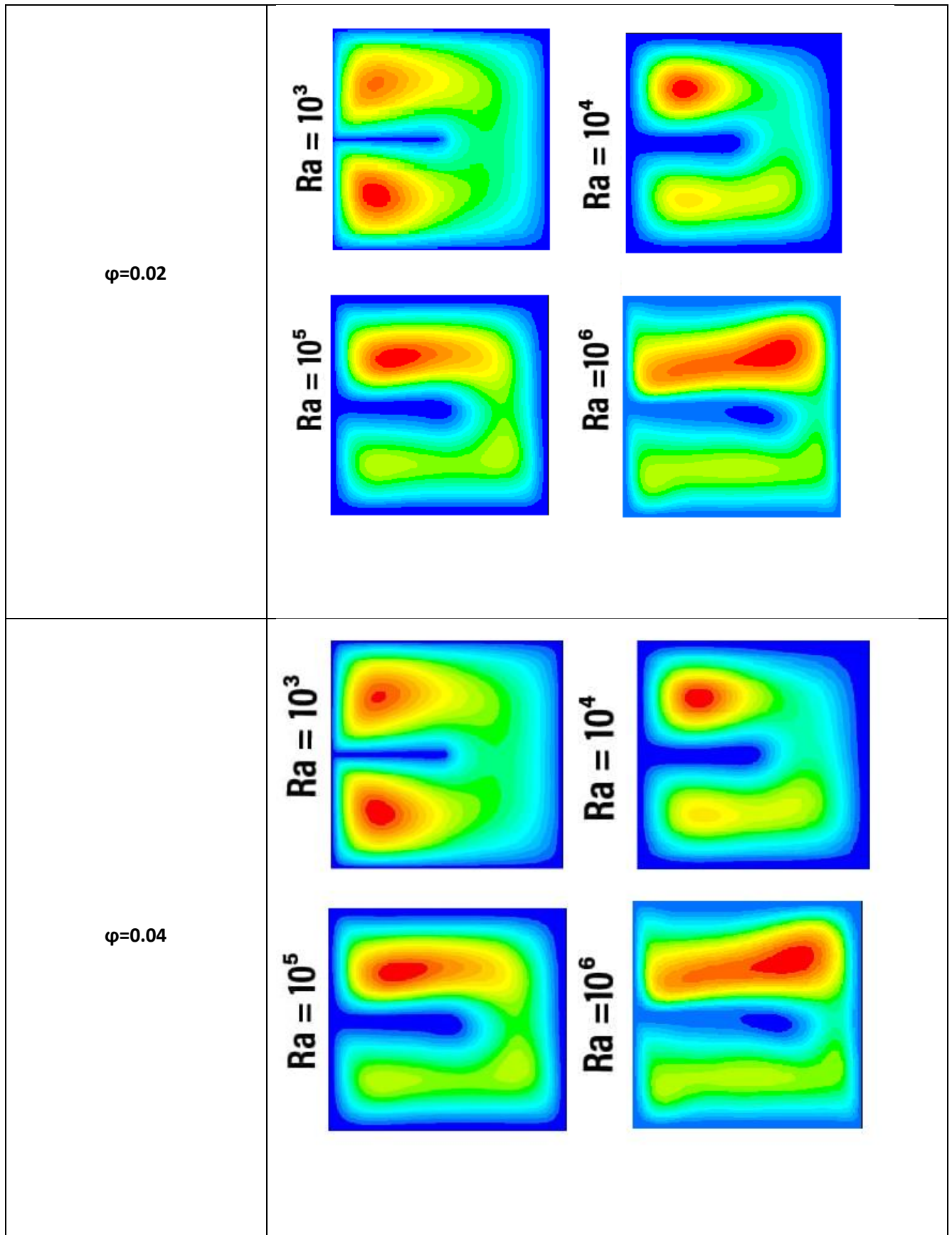
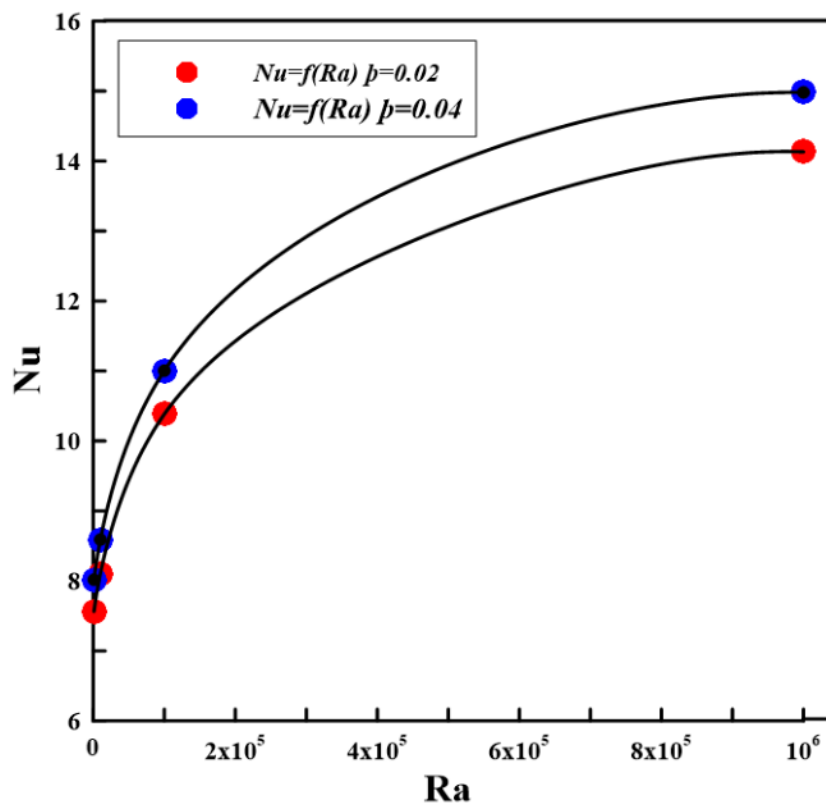


Figure III. 6 Les lignes de courants pour différents nombres de Rayleigh (Ra) et ( $\varphi$ )

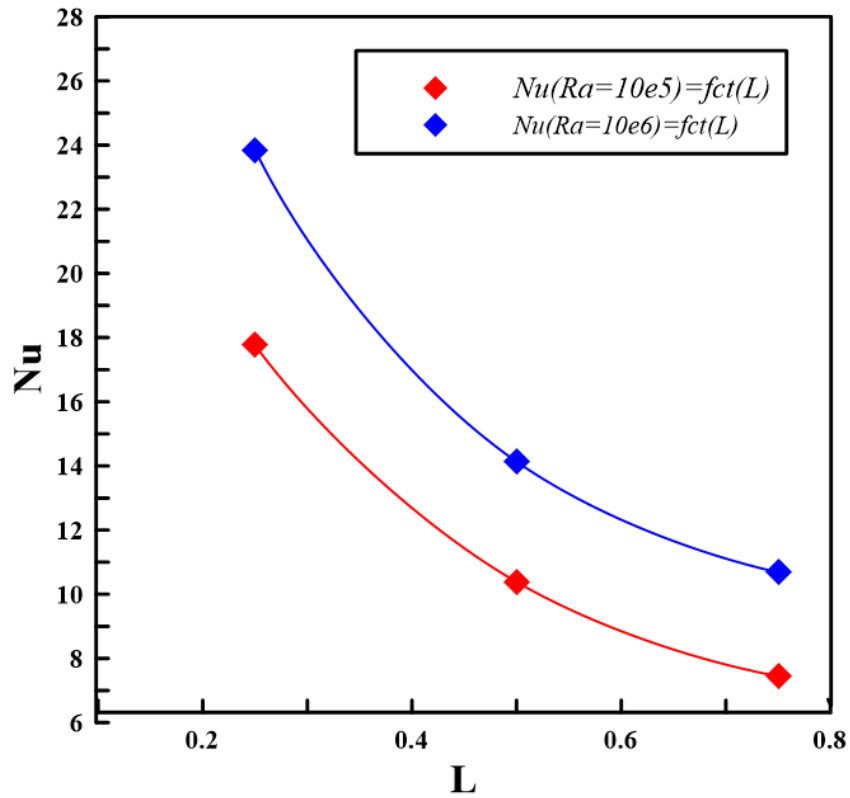
### II.9.1. Résultats et discussion

La figure III.6 et Figure III. 7 représente les lignes de courant et les lignes d'isothermes, pour quatre nombres de Rayleigh ( $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ). On remarque que pour un  $Ra=10^6$  les lignes de courant et d'isothermes sont sous forme concentrique autour de l'ailette chaude et presque la totalité de la cavité est occupée par le nanofluide. À mesure de l'augmentation de Rayleigh, les profils s'incurvent au haut et bas de l'ailette dans l'enceinte.



**Figure III.7** nombres de Nusselt en fonction Ra pour différentes fraction volumique

D'après les résultats de la Fig.7 Le nombre de Nusselt est une fonction croissante avec l'augmentation de nombre de Rayleigh, aussi on a une amélioration du transfert de la chaleur avec l'augmentation de la fraction volumique



**Figure. III. 9 :** nombre de nusselt en fonction de la longueur de l'ailette pour différents nombres de Ra

D'après les résultats de la Fig.9 Le nombre de Nusselt est une fonction décroissante avec l'augmentation de la longueur de l'ailette, aussi on a une amélioration du transfert de la chaleur ceci est dû à l'augmentation de nombre Rayleigh de  $Ra=10^5$  à  $Ra=10^6$

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle de l'écoulement bidimensionnel d'un nanofluide dans une cavité carrée à ailettes par l'utilisation des logiciels Gambit pour la création de géométrie et Fluent pour les calculs numériques. L'amélioration du transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité bidimensionnelle remplie de nanofluide avec une température chaude pour la paroi droite et pour l'ailette et la paroi gauche maintenue à une température froide. En se basant sur la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations mathématiques, nous avons pu déterminer les lignes de courant, les isothermes ainsi que les variations du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh. Les résultats de simulation sont obtenus avec le code FLUENT. L'étude Numérique pour différentes fraction volumique (0.02 et 0.04) et nombre de Rayleigh ( $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ).

Les principaux Résultats issus de cette étude sont : L'augmentation du nombre de Rayleigh tend à l'amélioration du transfert de chaleur une suite logique de ce travail consiste à étudier l'importance de l'effet d'augmentation du nombre de Rayleigh.

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- [1] Bouton M Evaluation de l'intérêt énergétique des nanofluides dans l'usage des machines frigorifiques 79
- [2] Salhi H Convection naturelle dans les enceintes: nanofluide 10
- [3] Seddik K Etude numérique de la convection mixte au sein d'une cavité cubique ventilée et remplie de nanofluides 90
- [4] Essma B Etude numérique des transferts thermiques convectifs avec nano-fluides 168
- [5] Anon Effet des nanoparticules sur l'amélioration du 12
- [6] Hayat T and Nadeem S 2017 Heat transfer enhancement with Ag–CuO/water hybrid nanofluid *Results in Physics* **7** 2317–24
- [7] Bainbridge C A, Kelly E L and Walking W D 1977 In vitro adsorption of acetaminophen onto activated charcoal *J Pharm Sci* **66** 480–3
- [8] Putra N, Roetzel W and Das S K 2003 Natural convection of nano-fluids *Heat and Mass Transfer* **39** 775–84
- [9] Eastman J A, Choi S U S, Li S, Yu W and Thompson L J 2001 Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles *Appl. Phys. Lett.* **78** 718–20
- [10] Hadaoui A Effets de taille et de concentration sur les propriétés thermiques et rhéologiques des nanofluides 154
- [11] Klaleche S and Madjour A 2015 *Simulation numérique de la convection forcée entre deux disques en présence d'un nanofluide* Thesis (Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou)
- [12] Wong K V and De Leon O 2010 Applications of Nanofluids: Current and Future *Advances in Mechanical Engineering* **2** 519659
- [13] Nguyen Van C, Do T H, Chen J-W, Tzeng W-Y, Tsai K-A, Song H, Liu H-J, Lin Y-C, Chen Y-C, Wu C-L, Luo C-W, Chou W-C, Huang R, Hsu Y-J and Chu Y-H 2017 WO3 mesocrystal-assisted photoelectrochemical activity of BiVO<sub>4</sub> *NPG Asia Mater* **9** e357–e357
- [14] Proust V Élaboration de nanocomposites céramiques carbures/nitrures à partir de polymères 267
- [15] Lebbihi S 2015 REFROIDISSEMENT PAR CONVECTION NATURELLE D'UNE SOURCE DE CHALEUR LOCLISEE AU FOND D'UNE ENCEINTE REMPLIE DE NANOFLUIDE
- [16] Habib S E 2013 *Application des NANOFLUIDES pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple* Thesis

- [17] Adnani M, Meziani B and Ourrad O Convection Mixte Dans Une Cavité Carrée En Présence D'un Bloc Soumis à une Température Froide 5
- [18] Adnani M and Meziani B 2017 Transfert de Chaleur dans une Cavité Carrée Soumise aux Différentes Conditions aux Limites 3
- [19] Massinissa A, Bachir M, Ouerdia O and Mounir Z 2016 Natural Convection in a Square Cavity: Numerical Study for Different values of Prandtl Number 14
- [20] Boudjeniba B, Laouar S and Mezaache E H 2015 Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire contenant un nanofluide . *Constantine* 11
- [21] Sad Chemloul N and Belmiloud M a 2016 Effet des nanoparticules sur l'amélioration du transfert thermique dans une cavité carrée *JREEN* **19** 397–408
- [22] Lai F-H and Yang Y-T 2011 Lattice Boltzmann simulation of natural convection heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids in a square enclosure *International Journal of Thermal Sciences* **50** 1930–41



## Résumé

Dans ce travail on a mené une Étude de la convection naturelle dans une cavité carrée remplie de nanofluide a été réalisée de mélange de fluide de base (l'air) et nanoparticules ( $AL_2O_3$ ) pour un nombre de Rayleigh variant de  $10^3$  à  $10^6$ , et deux fractions volumiques des nanoparticules (0.02, 0.04). La géométrie elle représente une cavité carrée rempli de nanofluide, La surface de la paroi inferieure est supérieure est maintenue adiabatique, la paroi droite chauffée par une source de chaleur (paroi chaude) et la paroi gauche est refroidies (paroi froide) celle-ci est douté d'une ailette horizontale chaude de longueur  $L=0.5$  et situé au milieu de la paroi  $h=0.5$ . Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis. Un code de calcul a été conçu et réalisé dans ce contexte pour utiliser la simulation numérique comme outil d'investigation. Les résultats sont analysés au champ thermique et dynamique, ainsi l'influence du nombre de Reynolds sur le transfert de chaleur et l'addition des nanoparticules ( $AL_2O_3$ ) dans l'air permet d'améliorer la performance de transfert de chaleur.

**Mots clés :** Nanofluide, Convection naturelle, transfert de chaleur, nombre de Rayleigh, cavité.

## Abstract

In this work we carried out a study of natural convection in a square cavity filled with nanofluid was carried out with a mixture of base fluid (air) and nanoparticles ( $AL_2O_3$ ) for a Rayleigh number varying from  $10^3$  to  $10^6$ , and two volume fraction of nanoparticles (0.02, 0.04). The geometry it represents a square cavity filled with nanofluid, the surface of the lower wall is higher is maintained adiabatic, the right wall heated by a heat source (hot wall) and the left wall is cooled (cold wall) this one is doubted a hot horizontal fin of length  $L = 0.5$  and located in the middle of the wall  $h = 0.5$ . The governing equations have been solved numerically using the finite volume method. A computer code was designed and produced in this context to use numerical simulation as an investigative tool. The results are analyzed under thermal and dynamic fields, so the influence of Reynolds number on heat transfer and the addition of nanoparticles ( $AL_2O_3$ ) in air improves heat transfer performance.

**Keywords:** Nanofluid, Natural convection, heat transfer, Rayleigh number, cavity

